



Desarrollo de Transductores Ultrasónicos de Potencia con Radiadores de Placa para Procesos Industriales en Líquidos.

A. Bazán Sulzberger, J. A. Gallego Juárez y G. Rodríguez Corral.

Instituto de Acústica CSIC, c/ Serrano, 144, 28006 Madrid, España.

RESUMEN: Para poder trasladar a escala industrial las múltiples aplicaciones de los ultrasonidos de potencia para procesos en medios líquidos es necesario producir efecto en volúmenes considerables. La cavitación, que es el fenómeno básico en estos procesos, sólo se produce con suficiente intensidad a poca distancia del radiador. En el Grupo de Ultrasonidos de Potencia del Instituto de Acústica – CSIC se están desarrollando sistemas de transducción con placa radiante de superficie extensa para la insonificación en continuo de líquidos en capas delgadas. Esta configuración permite el tratamiento de volúmenes grandes de líquido y, por tanto, hace posible que las múltiples aplicaciones encontradas en laboratorio para los ultrasonidos de potencia en estos medios sean escalables a condiciones de producción industrial. Para conseguir este objetivo ha sido necesario optimizar este tipo de sistemas para adecuarlos a las limitaciones tecnológicas generales y a las condiciones prácticas de cada aplicación. En este trabajo se presenta el desarrollo optimizado de este tipo de transductores con el fin de incrementar su capacidad de potencia y mejorar sus características operativas.

ABSTRACT: To scale up at industrial stage the multiple applications of high power ultrasound for processing in liquid media it is necessary to produce effect in a considerable volume of liquid. Cavitation is the main phenomenon involved in this kind of applications. This phenomenon only occurs with enough intensity very close to the radiator surface. In the High Power Ultrasound Group of the Instituto de Acústica - CSIC we are developing transducer systems with large radiating plates for the continuous sonication of thin layers of liquids. This configuration allows considerable volume of liquid to be treated and, so that, it makes possible to scale up at industrial conditions the multiple applications of high power ultrasound found at laboratory scale. To achieve such objective it has been needed to optimise this kind of systems in order to adapt them to the general technological limitations and the practical conditions of each application. This work deals with the optimised development of this kind of transducers in order to increase their power capacity and to improve their operational characteristics.

1. INTRODUCCIÓN.

Las aplicaciones de ultrasonidos de potencia en medios líquidos son bien conocidas [1, 2]. Estas aplicaciones se han investigado en laboratorio usando transductores tipo “sandwich” o sonotrodo (“sandwich” con amplificador mecánico) que tienen una superficie radiante de pequeñas dimensiones respecto la longitud de onda, y por tanto, solo permiten tratar un volumen de líquido reducido. El fenómeno más determinante en este tipo de aplicaciones es la cavitación transitoria [3], que, en general, se produce para intensidades acústicas superiores a 1 W/cm^2 . Este fenómeno es de escasa penetración en el seno del líquido, ya que la propia

nube de burbujas que la cavitación genera, atenúa fuertemente la onda acústica, impidiendo su penetración. En consecuencia, el efecto se produce solamente a distancias muy cercanas al radiador acústico. Estas distancias, en líquidos de alta viscosidad, puede ser de muy pocos milímetros.

Por tanto, para procesar un volumen industrial de líquido es necesario tratar superficies extensas, lo que requiere radiadores de gran área. Este tipo de radiadores plantea una serie de problemas específicos. En primer lugar, la superficie extensa implica una impedancia de radiación elevada. Como son necesarias altas intensidades acústicas, se requiere aplicar una potencia eléctrica elevada y, debido a la alta impedancia del transductor, la tensión eléctrica a aplicar tiene que ser alta, siendo esta una de las principales limitaciones tecnológicas que se plantean.

Además, la cavitación modifica las características del propio medio. Como el transductor de placa es un sistema muy resonante y su frecuencia de resonancia depende, en parte, del medio, se precisa un sistema de excitación con un seguimiento de frecuencia muy específico ya que la resonancia variará significativamente.

Estas son las consideraciones generales sobre las que se ha trabajado. Aparte, cada aplicación concreta plantea problemas técnicos específicos que hay que solucionar.

2. TRANSDUCTOR DE POTENCIA CON RADIADOR DE PLACA EN MEDIO LÍQUIDO.

La solución adoptada para la emisión de energía ultrasónica mediante radiadores de superficie extensa es un transductor del tipo placa vibrante compuesto por un elemento de transducción tipo “sandwich”, un amplificador mecánico y una placa vibrando a flexión en uno de sus modos propios (figura 1). Esta placa es la que constituye el radiador en el medio líquido. El conjunto elemento de transducción – amplificador mecánico lo denominaremos en lo sucesivo como vibrador.

La frecuencia de trabajo se ha elegido en torno a 20 kHz, donde los efectos de cavitación son intensos.

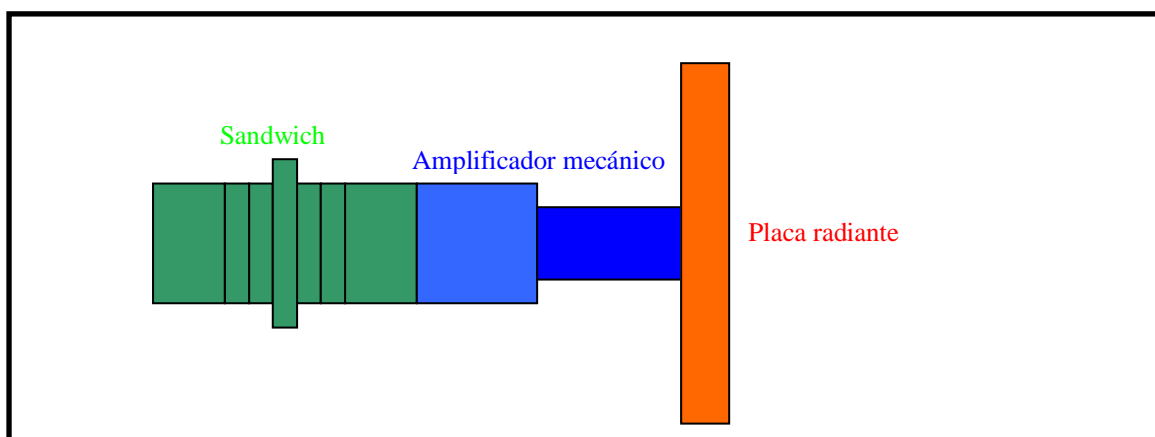


Figura 1 – Esquema del sistema de transducción con placa vibrante.

2.1. Diseño de la placa.

El diseño de la placa radiante se ha realizado siguiendo las siguientes consideraciones.

1-Forma: Se ha elegido una placa de forma rectangular, ya que con esta forma se pueden excitar modos de vibración con líneas nodales paralelas. Con estos modos se consiguen tratamientos bastante homogéneos, ya que el flujo de líquido, moviéndose perpendicularmente a las líneas nodales se hace pasar por las regiones de máximo desplazamiento vibratorio.

2-Material: El material seleccionado ha sido la aleación de titanio Ti-6Al-4V, que combina unas buenas propiedades elásticas con una alta resistencia a la fatiga y a la erosión, aspectos muy a tener en cuenta en procesos de cavitación.

3-Dimensiones: Las dimensiones se han calculado de acuerdo con el modo de vibración y la frecuencia de resonancia elegidos. Se ha buscado asimismo evitar la proximidad de otros modos propios que se pudieran acoplar con el modo principal perturbándolo.

2.2. Diseño del vibrador.

La filosofía de diseño del vibrador es una de las aportaciones más novedosas de este trabajo. El diseño del transductor, es decir, del conjunto formado por el vibrador y la placa, se ha realizado combinando la simulación por elementos finitos con los datos experimentales obtenidos con un prototipo preliminar de transductor.

Esta combinación del estudio numérico, mediante elementos finitos, con los resultados experimentales ha sido fundamental para el desarrollo de estos transductores, ya que la modificación del medio líquido, producida por la nube de burbujas de cavitación, no es modelable mediante elementos finitos. Esta modificación del medio hace que la frecuencia de resonancia, en condiciones de trabajo, se sitúe en un valor comprendido entre las frecuencias de resonancia del transductor radiando en aire y radiando en un medio líquido no alterado.

Para conseguir una sintonía optimizada primero se modeló con elementos finitos el transductor radiando en líquido. Sobre este modelo se construyó un prototipo preliminar con el que se realizaron una serie de pruebas experimentales en condiciones similares a las de trabajo. Con estos experimentos se cuantificó la variación de la frecuencia de resonancia del conjunto del transductor.

La frecuencia de resonancia de la placa radiante sólo depende del material que lo constituye, de sus dimensiones y de las condiciones de contorno, que son las que se modifican al producirse la cavitación. A partir del dato de variación de la frecuencia de resonancia por efecto de la cavitación, se vuelve a modelar el sistema de transducción mediante elementos finitos. Así se establecen las nuevas dimensiones del vibrador que permiten que el conjunto vibrador-placa esté acoplado para trabajar a la frecuencia de resonancia de la placa en condiciones de cavitación. Es decir, con este estudio se calculan las dimensiones del vibrador que consiguen la mejor sintonía con la placa en condiciones de trabajo.

Como resultado se ha conseguido un prototipo de transductor con una reducción drástica en su impedancia, respecto al prototipo preliminar. Esta reducción de impedancia permite que el transductor pueda trabajar de manera continua dentro de los límites tecnológicos de tensión eléctrica para potencias elevadas. La mejora de impedancia se puede apreciar en la figura 2.

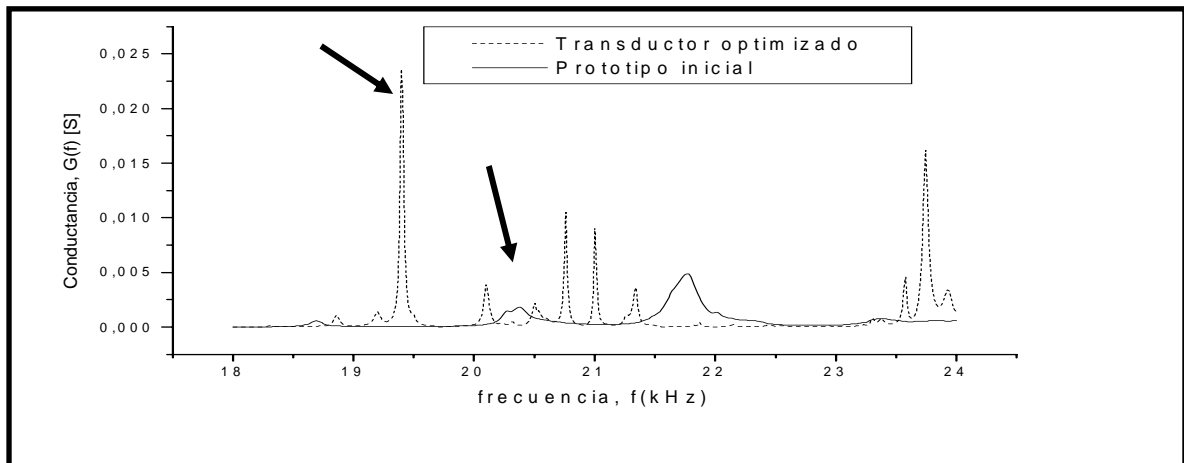


Figura 2 – Mejora de la impedancia en el modo de trabajo (marcado con una flecha →).

En las figuras 3 y 4 se muestran fotografías del prototipo de transductor desarrollado durante este trabajo.

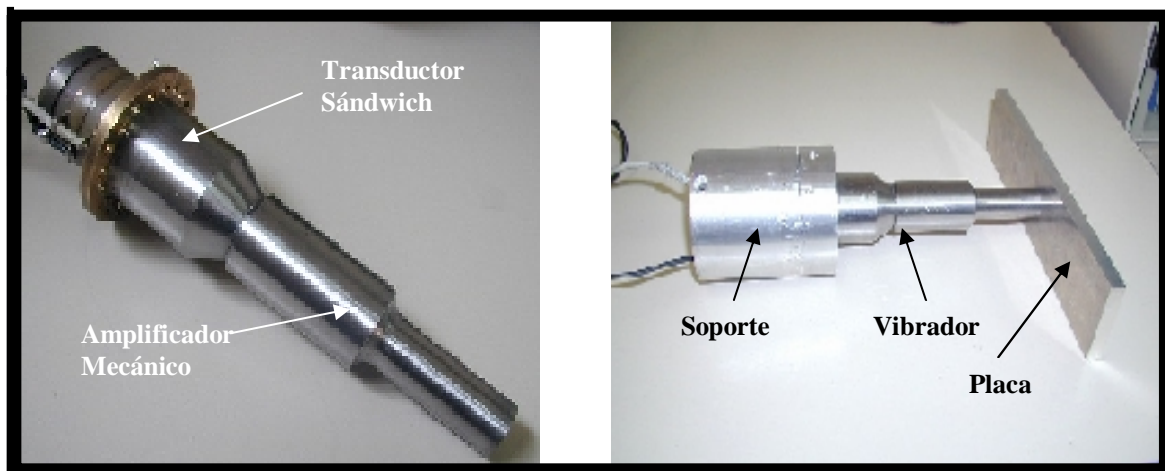


Figura 3 – Fotografía del cuerpo del vibrador.

Figura 4 – Fotografía del transductor de placa para líquidos.

2.3. Configuraciones de trabajo.

Como se ha indicado anteriormente, para producir efecto en un volumen suficiente se trabaja sobre una capa de líquido que pasa de forma continua bajo la superficie de la placa radiante. El espesor de la capa depende de las propiedades del propio medio líquido, como por ejemplo, su atenuación, viscosidad, etc.

En la figura 5 se puede apreciar un esquema del sistema de transducción con paso continuo de líquido.

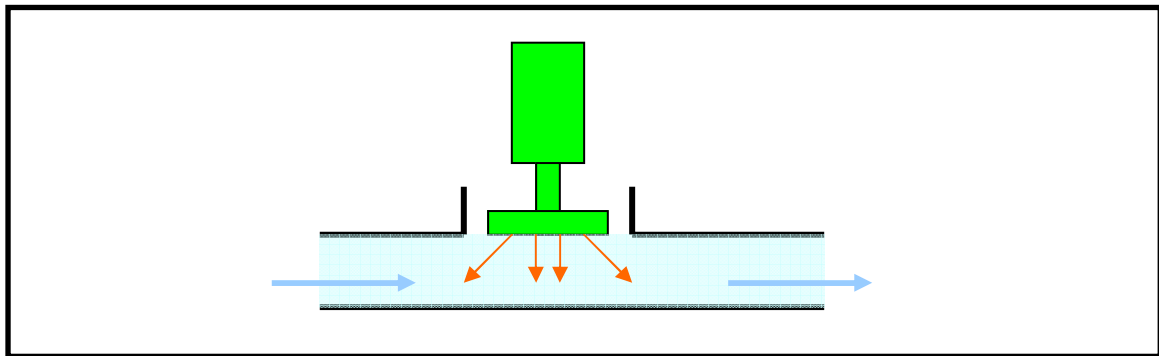


Figura 5 – Esquema del transductor de placa con paso continuo de líquido.

Se han adoptado dos configuraciones básicas de trabajo. En la primera, que ya se había experimentado previamente en los laboratorios del grupo de Ultrasonidos de Potencia, el medio es irradiado por una sola cara de la placa. Esta configuración requiere una cámara abierta para contener el líquido y es la que se ha empleado en aplicaciones como la limpieza de textiles [4]. Esta configuración, sin embargo, plantea problemas para un paso continuo de líquido, ya que requiere controlar perfectamente el nivel para evitar que la placa se sumerja o que pierda contacto con el líquido. Para líquidos viscosos este control de nivel resulta poco factible de forma práctica.

Una nueva configuración que se presenta en este trabajo consiste en sumergir la placa completamente en el medio líquido. De esta forma las dos caras de la placa radian al medio y se duplica la superficie de radiación, aunque esto produce también un aumento en la impedancia. Esta configuración permite además producir efecto en el seno del propio medio líquido, lo que puede ser de interés en algunas aplicaciones, como por ejemplo, la homogeneización de suspensiones. Para verificar la viabilidad de esta configuración hubo que estudiar la simetría del efecto por ambas caras.

Esta configuración permite trabajar con cámaras cerradas donde el flujo está perfectamente controlado y el líquido aislado del exterior.

En la figura 6 se puede observar la primera configuración. En esta fotografía se aprecian las líneas nodales del modo de trabajo visualizadas con polvo de esmeril. En la figura 7 se puede apreciar la segunda configuración. En esta fotografía se observa la nube de cavitación y como esta se concentra en un espesor de líquido muy cercano a la placa.



Figura 6 – Fotografía de la placa radiando al medio líquido por una cara.



Figura 7 – Fotografía de la placa radiando por las dos caras.

3. SOLUCIÓN A ALGUNOS PROBLEMAS PRÁCTICOS.

Durante el desarrollo de este tipo de sistemas han surgido una serie de problemas prácticos que ha habido que ir resolviendo para conseguir un transductor capaz de trabajar de manera continua y estable en el tiempo. Esta estabilidad en el tiempo es imprescindible para conseguir un volumen de producción interesante para las aplicaciones industriales.

3.1 Aislamiento eléctrico.

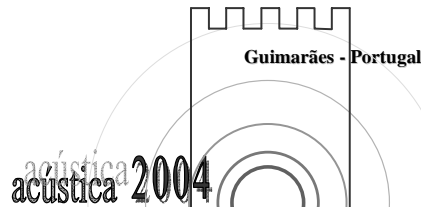
Al trabajar en medios líquidos se hace necesario aislar las cerámicas piezoeléctricas de posibles contactos con el líquido o con gases inflamables que pueden producir cortocircuitos, arcos voltaicos, etc. En un estadio inicial del desarrollo este aislamiento se consiguió mediante un “sandwich” asimétrico que permite colocar todas las cerámicas separadas de la cámara de tratamiento. En generaciones posteriores del prototipo, el cierre hermético situado en el amplificador mecánico para conseguir una cámara cerrada de tratamiento, soluciona directamente este problema.

3.2. Calentamiento.

Aunque el tipo de transductores utilizados tiene una eficiencia muy elevada, las altas potencias aplicadas y, particularmente, los procesos de tratamiento en continuo, hacen que se genere mucho calor en las cerámicas y que la temperatura llegue a subir por encima de las condiciones que permiten un uso prolongado (70 °C).

La primera medida que permitió reducir este problema fue un rediseño del transductor, con una nueva distribución de cerámicas, situándolas simétricamente a un lado y a otro de la pieza metálica de soporte. De esta manera se duplicó la capacidad de disipación de calor al duplicar la superficie de cerámica en contacto con piezas metálicas, que actúan de disipadores del calor.

Para conseguir un equilibrio entre el calor generado y disipado se ha acoplado además un sistema de ventilación que ha permitido trabajar dentro de los límites de temperatura de forma estable en el tiempo.



3.3-Seguimiento de la resonancia.

El sistema de excitación elegido es similar al de transductores de placa para radiación en medios gaseosos, basados en un PLL con lazo de realimentación para generar una señal sinusoidal que consiga un desfase de 0° entre corriente y tensión eléctrica (condición de fase para resonancia). La problemática de este tipo de aplicación es distinta a los transductores para aire ya que, aunque la banda es más ancha y no hace falta tanta precisión en frecuencia, la cavitación produce un elevado ruido de fase en la señal de control y hay una mayor incertidumbre a la hora de localizar la resonancia. Además, la frecuencia de resonancia varía entre el estado de radiación con baja potencia, donde la resonancia se aproxima a la del sistema radiando en líquido, y el estado de radiación con potencia elevada (cavitación) donde la resonancia se acerca a la de radiación en aire. Es decir, existe una modificación significativa de la frecuencia de resonancia en función de la potencia aplicada.

Una selección adecuada de los parámetros de control y de la bobina de compensación de la capacidad estática de las cerámicas piezoeléctricas, ha permitido un funcionamiento estable de este tipo de sistemas.

3.4. Tensión eléctrica necesaria superior a los límites tecnológicos.

Para algunas aplicaciones concretas es necesario procesar un volumen de líquido muy elevado para obtener una ventaja competitiva real respecto a la tecnología convencional empleada.

En este caso es necesario trabajar con superficies tan extensas que implican impedancias muy elevadas y por tanto, tensiones eléctricas superiores a los límites tecnológicos actuales.

La solución que se ha aplicado de manera práctica es dividir la superficie de radiación entre cierto número de transductores, lo cual reduce la impedancia de cada transductor, de forma que las tensiones de excitación necesarias se encuentren dentro de los límites tecnológicamente admitidos.

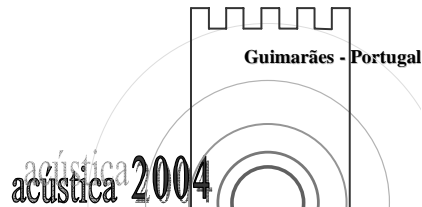
4. CONCLUSIONES.

El desarrollo de un sistema de transducción ultrasónica de placa radiante en medio líquido de paso continuo está permitiendo trasladar a escala de producción industrial algunos procesos de los ultrasonidos de potencia encontradas en el laboratorio.

Este sistema se basa en un transductor de placa de superficie extensa vibrando a flexión en uno de sus modos propios. Como el efecto de cavitación se produce sólo en las capas líquidas próximas al radiador, la estrategia adoptada para conseguir el procesado de grandes volúmenes de líquido ha consistido en el paso de una capa del mismo sobre la superficie del radiador circulando de forma continua y a la velocidad que permite la producción del fenómeno de cavitación.

Los procesos cavitatorios necesitan una gran intensidad acústica, lo que hace necesario optimizar el diseño de los transductores. En este sentido se ha desarrollado un procedimiento para conseguir una sintonía adecuada entre las frecuencias del excitador y la de la placa en las condiciones reales de trabajo. Este procedimiento combina un análisis numérico mediante elementos finitos con un ajuste experimental a las condiciones reales que no son modelables.

Por otra parte, cada aplicación concreta tiene unas especificaciones y requisitos que hacen necesario una adaptación del esquema general. En este sentido se ha desarrollado una nueva



configuración de trabajo, con la placa totalmente sumergida en el medio líquido, a partir de una configuración ya existente en la cual la placa sólo radiaba al medio por una cara.

Finalmente, para la obtención de un sistema de interés para la industria se hace necesario que el proceso funcione de forma estable en el tiempo. Esta estabilidad se ha conseguido tras resolver una serie de problemas prácticos que se han ido presentando, tales como las altas tensiones eléctricas necesarias, el aislamiento de la parte eléctrica, el calentamiento de las cerámicas, o el seguimiento de frecuencia en unas condiciones muy específicas.

En el grupo de Ultrasonidos de Potencia del Instituto de Acústica-CSIC se está trabajando actualmente en una serie de proyectos en los que se está aplicando este tipo de sistemas de transducción con resultados satisfactorios.

RECONOCIMIENTOS.

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración de Fernando Vázquez, Alfonso Blanco, Víctor Acosta, Alberto Pinto, Enrique Riera, David Chacón, e Ignacio Martínez. Dedicamos este trabajo a la memoria nuestro compañero Fernando Vázquez.

Este trabajo se ha llevado a cabo dentro del proyecto europeo CRAFT 1999-71579.

REFERENCIAS.

- [1] Juan A. Gallego Juárez; *High Power Ultrasound*. En Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. John Wiley & sons, Inc. 1999, pp. 49-59.
- [2] Timothy J. Mason; *High Powered Ultrasound in Physical and Chemical Processing*. En New Acoustics. Selected Topics. (Ed. C. Ranz and J.A. Gallego). CSIC, Madrid, 2002, pp. 106-138.
- [3] L. Gaete, Y. Vargas, R. Vargas, J. A. Gallego, and F. Montoya; *On the Onset of Transient Cavitation in Gassy Liquids*. En Journal of the Acoustical Society of America 101 (1997), pp. 2536-40.
- [4] J. A. Gallego Juárez, G. Najera, G. Rodríguez Corral, F. Vázquez Martínez, P. Van der Vlist; *Procedimiento y Dispositivo para Lavado Ultrasónico de Textiles en Continuo*. Patente española, solicitud nº 9602092, octubre 1996. Aprobada, 1999, nº 2116930.